

APPARATUS AND METHOD FOR MEASURING THE WAVEFRONT OF AN OPTICAL SYSTEM

- 5 Die Erfindung bezieht sich auf eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Wellenfrontvermessung eines optischen Systems, insbesondere durch eine interferometrische Messtechnik.

Derartige Vorrichtungen und Verfahren werden insbesondere zur
10 Ermittlung der Abbildungsgüte von hochpräzise abbildenden Optiken eingesetzt. Ein wichtiger Anwendungsfall ist die hochgenaue Vermessung des Abbildungsverhaltens von Projektionsobjektiven in Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlagen. Dabei kann alternativ zur Verwendung eines separaten Messplatzes vorgesehen sein, die Wellen-
15 frontvermessung des Objektivs in-situ, d.h. in seinem Einbauszustand in der Belichtungsanlage, vorzunehmen. Dazu ist die Vermessungsvorrichtung dann in die Belichtungsanlage integriert. Die Vermessung des Objektivs erfolgt vorzugsweise bei Betriebswellenlänge, d.h. bei derjenigen Wellenlänge, mit der die Belichtungsanlage im Belichtungs-
20 betrieb arbeitet. Eine solche Vermessungsvorrichtung wird deshalb auch als Betriebsinterferometer (BIF) bezeichnet. In einem engeren Sinn wird dieser Begriff besonders für solche bei Betriebswellenlänge arbeitenden

Vermessungsvorrichtungen gebraucht, die mit lateraler Scherinterferometrie arbeiten.

Ein solches BIF ist beispielsweise in der Offenlegungsschrift DE 101 09
5 929 A1 in einer als Standard-BIF (S-BIF) bezeichneten Realisierung
offenbart. Vorrichtungen dieses Standard-BIF-Typs umfassen zur Wellen-
frontvermessung des Objektivs ein objektseitig, vorzugsweise in oder
nahe einer Objektebene des Objektivs, anzuordnendes Maskenstruktur-
element, ein bildseitig, vorzugsweise in oder nahe einer Bildebene des
10 Objektivs, anzuordnendes Beugungsstrukturelement, einen Detektor,
z.B. eine CCD-Kamera, im Strahlengang hinter dem Beugungsstruktur-
element sowie eine detektorseitige Abbildungsoptik, typischerweise mit
einem Mikroskopobjektiv, zwischen Beugungsstrukturelement und Det-
ektor. Das Beugungsstrukturelement besitzt typischerweise eine in ein
15 oder mehreren Richtungen periodische Beugungsgitterstruktur, und das
Maskenstrukturelement fungiert als sogenannte Kohärenzmaske und
weist dazu eine geeignete, meist ebenfalls periodische Maskenstruktur
auf. Die detektorseitige Abbildungsoptik bildet die Beugungsstruktur
bzw. die darauf vom Objektiv abgebildete Maskenstruktur in das Fern-
20 feld und damit eine Pupille des Objektivs auf den Detektor ab.

Als Alternative zum Standard-BIF ist ein sogenanntes Kompakt-BIF
(K-BIF) in Gebrauch, welches ohne die detektorseitige Abbildungsoptik
arbeitet und mit seinem Detektor das erzeugte Wellenfront-Interfe-
25 renzmuster im Quasi-Fernfeld aufnimmt. Dazu wird die Detektorfläche
mit kurzem Abstand hinter dem Beugungsstrukturelement platziert, oder
die von diesem kommende Strahlung wird z.B. mit einem sogenannten
Faceplate zur Kamerafläche weitergeleitet, dessen Eintrittsfläche in
kurzem Abstand hinter dem Beugungsstrukturelement platziert wird.

30

Das BIF detektiert in den beiden Varianten Standard-BIF (S-BIF) und
Kompakt-BIF (K-BIF) nicht direkt die vom vermessenden optischen Sys-

tem kommende Wellenfront, sondern deren erste Ortsableitungen. Deren Variation, d.h. speziell die Größe der zweiten partiellen Ortsableitung an der Wellenfront, bestimmt und begrenzt den Messbereich, d.h. den Dynamikbereich, in welchem die Vermessungsvorrichtung eingesetzt werden kann. Dies wird wesentlich von den Aberrationen des vermessenen optischen Systems und bei der Scherinterferometrie von dem sogenannten Scherabstand beeinflusst. Speziell bei der Vermessung von optischen Systemen im unjustierten Zustand oder von Systemteilen oder Baugruppen von optischen Systemen mit relativ großen Aberrationen kann dies zu einer starken Messbereichsbeschränkung führen, d.h. die Phasenmodulation der zu detektierenden Wellenfront überschreitet eine gewisse Obergrenze, so dass das Interferenzmuster vom Detektor nicht mehr mit der gewünschten Auflösung über die gesamte wirksame Detektorfläche hinweg detektiert werden kann, wenn keine Gegenmaßnahmen getroffen werden.

Als Gegenmaßnahmen kommen zwar grundsätzlich eine Steigerung der räumlichen Auflösung des Detektors bzw. der Anzahl von Detektorpixeln z.B. einer CCD-Kamera und eine Verkleinerung des Scherabstandes in der lateralen Scherinterferometrie durch Wahl größerer Periodenlängen der Beugungs-/Maskenstrukturen in Betracht. Die Detektorauflösung ist jedoch durch die Mindestgröße von Detektorpixeln begrenzt, und die Wahl eines kleineren Scherabstands über den gesamten Erfassungsbereich, d.h. den gesamten erfassten Querschnitt der das optische System vermessenden Strahlung, hinweg führt in Fällen mit sehr ungleichmäßiger Variation der Wellenfront dazu, dass das Signal/Rausch-Verhältnis für einen Großteil der Detektorpixel sehr klein wird und folglich nur ein kleiner Teil der Detektorpixel effektiv zur Wellenfrontmessung mit guter Reproduzierbarkeit beiträgt.

30

Während das S-BIF durch die detektorseitige Abbildungsoptik das Interferenzmuster in das Fernfeld sinuskorrigiert, d.h. aplanatisch, auf

die Detektorfläche abbildet, wird das Interferenzmuster beim K-BIF durch Freiraumausbreitung in eine quasi-fernfeldnahe Ebene auf die Detektorfläche abgebildet. Im Fall eines vermessenen optischen Abbildungssystems, wie eines Mikrolithographie-Projektionsobjektivs, bedeutet dies, dass die erste räumliche Ableitung der Wellenfront in einer Pupille des Abbildungssystems beim S-BIF im wesentlichen unverzerrt, beim K-BIF hingegen schon prinzipbedingt nicht sinuskorrigiert und folglich mit einem entsprechenden Verzeichnungsfehler abgebildet wird. Je nach verwendetem Detektionssystem kann auch dieses mit einem gewissen, geringen Verzeichnungsfehler behaftet sein. Da die Wellenfrontvermessung typischerweise die Maßnahme beinhaltet, aus dem detektierten Interferenzmuster auf den Wellenfrontverlauf im vermessenen optischen System und insbesondere in einer Pupillenebene eines vermessenen optischen Abbildungssystems rückzuschließen, um die Strahlführungsqualität oder Abbildungsgüte des optischen Systems zu bestimmen, besteht Bedarf an Maßnahmen zur geeigneten Berücksichtigung von Verzeichnungsfehlern.

Aus der Patentschrift US 6,650,399 B2 ist es hierzu für den Fall einer interferometrischen Pinhole-Messtechnik bekannt, einen Verzeichnungsfehler durch Berechnen einer entsprechenden Verzeichnungstransformation mittels einer sogenannten Fokustaffel zu kalibrieren, d.h. mittels einer Abfolge von Messvorgängen in verschiedenen axialen Position von Pinhole und Detektor und somit verschiedenen Fokuspositionen.

25

Zur Wellenfrontvermessung optischer Systeme sind auch Fizeau-Interferometer mit K-Optik in Gebrauch, diese lassen sich im allgemeinen jedoch nicht sehr kompakt bauen und sind relativ stör anfällig gegenüber Umgebungseinflüssen. Außerdem führt deren kohärente Lichtquelle meist zu sogenannten Speckle-Effekten.

30

Der Erfindung liegt als technisches Problem die Bereitstellung einer Vorrichtung und eines Verfahrens zugrunde, mit denen sich optische Systeme und insbesondere Baugruppen oder Teilsysteme von optischen Systemen mit verhältnismäßig geringem Aufwand sehr genau mittels
5 einer Wellenfrontmesstechnik vermessen lassen.

Gemäß einem ersten Aspekt löst die Erfindung dieses Problem durch die Bereitstellung einer Vorrichtung zur Wellenfrontvermessung eines optischen Systems, die eine Detektoranordnung im Strahlengang hinter
10 dem optischen System zur Detektion eines erzeugten Interferenzmusters einer Wellenfront innerhalb eines Erfassungsbereichs und ein Dynamikbereich-Korrekturelement im Strahlengang vor der Detektoranordnung umfasst, das eine Variation eines ortsabhängigen Verlaufs einer Phase der das Interferenzmuster erzeugenden Wellen-
15 front über den Erfassungsbereich hinweg unter einem vorgebbaren Grenzwert hält. Mit dem Begriff Erfassungsbereich ist hierbei allgemein ein von der Messung erfasster System- oder Strahlquerschnitt gemeint, bei vermessenen optischen Systemen mit Pupille entspricht er der Pupille. Durch dieses Korrekturelement wird der Dynamikbereich der
20 Detektoranordnung gesteigert, so dass auch optische Systeme oder Subsysteme mit relativ großen Aberrationen, z.B. asphärische Optiksyste-
me, mit gewünschter Genauigkeit vermessen werden können. Die Messaufgabe kann z.B. auch darin bestehen, die Ist-Abweichung von einer stark asphärischen Soll-Wellenfront zu messen, z.B. bei optischen
25 Baugruppen.

In Ausgestaltung dieser Vorrichtung wird eine laterale Scherinterferometrietechnik verwendet. Das Dynamikbereich-Korrekturelement ist so ausgelegt, dass die zweiten partiellen Ortsableitungen der zu bestimm-
30 menden Wellenfront im gesamten Erfassungsbereich unter einem vorgebbaren Schwellwert gehalten werden, was den gewünschten hohen Dynamikbereich für den Detektionsvorgang gewährleistet.

In weiterer Ausgestaltung dieser Vorrichtung ist das Dynamikbereich-Korrekturelement ein computergeneriertes Hologramm-Element (CGH-Element) oder ein anderes diffraktives optisches Element (DOE) oder ein asphärisches Linsenelement. Diese Korrekturlemente können so ausgelegt werden, dass die gewünschte Steigerung des Dynamikbereichs erzielt wird. Bei Verwendung eines CGH-Elements lässt sich dessen lokale Beugungsstrukturperiode anhand von geometrisch-optischen Überlegungen bevorzugt aus einer relativ einfachen analytischen Beziehung berechnen.

In einer konstruktiv vorteilhaften Weiterbildung der Erfindung sind auf einem gemeinsamen transparenten Träger vorderseitig eine Beugungsgitterstruktur und rückseitig das Dynamikbereich-Korrekturlement vorgesehen.

In einem weiteren Aspekt beinhaltet die Erfindung zur Lösung des gestellten Problems eine Vorrichtung zur Wellenfrontvermessung eines optischen Systems unter Verwendung einer lateralen Scherinterferometrietechnik mit einem im Strahlengang vor dem optischen System positionierbaren Maskenstrukturelement und einem im Strahlengang hinter dem optischen System positionierbaren Beugungsstrukturelement, das eine periodische Beugungsstruktur aufweist, und mit einer Detektoranordnung im Strahlengang hinter dem Beugungsstrukturelement zur Detektion eines Interferenzmusters einer vom optischen System kommenden Wellenfront innerhalb eines vorgebbaren Erfassungsbereichs. Die Vorrichtung umfasst einen Satz von mehreren Beugungsstrukturen unterschiedlicher Periodenlängen und von korrespondierenden Maskenstrukturen des oder der Maskenstrukturelemente, um das optische System in verschiedenen Teilbereichen des Erfassungsbereichs bzw. der Pupille mit Beugungsstrukturen verschiedener Periodenlängen und zugehörigen Maskenstrukturen zu ver-

messen. Dies ermöglicht die Wahl von an die Variation des räumlichen Verlaufs der interferierenden Wellenfront angepassten Beugungsstruktur-Periodenlängen, was einer Verwendung verschiedener Scherabstände für die Scherinterferometriemessung in verschiedenen Teilbereichen des Erfassungsbereichs entspricht. Mit dieser Maßnahme kann die Messbereichsdynamik der Vorrichtung unter Beibehaltung einer hohen Messgenauigkeit gesteigert werden.

In Ausgestaltung dieser Vorrichtung wird wenigstens für einen ersten Erfassungsbereich-Teilbereich eine Beugungsstruktur mit einer ersten Periodenlänge und für einen zweiten Erfassungsbereich-Teilbereich mit gegenüber dem ersten Erfassungsbereich-Teilbereich höherer Wellenfront-Phasenmodulation eine Beugungsstruktur mit gegenüber der ersten Periodenlänge größerer Periodenlänge verwendet, wodurch sich die Messbereichsdynamik in der gewünschten Weise steigern lässt.

In einem alternativen Aspekt beinhaltet die Erfindung zur Lösung des gestellten Problems eine Vorrichtung zur Wellenfrontvermessung eines optischen Systems unter Verwendung einer Punktbeugungsinterferometrie-technik mit einer im Strahlengang vor dem optischen System positionierbaren Pinholemaske, einem strahlaufteilenden Element, z.B. einem Beugungsgitterelement, einer detektorseitigen Lochmaskenstruktur zur Positionierung im Strahlengang nach dem optischen System, die ein Referenz-Pinhole und eine davon beabstandete Signaldurchlassöffnung aufweist, sowie mit einer Detektoranordnung im Strahlengang hinter der detektorseitigen Lochmaskenstruktur. Die Vorrichtung umfasst einen Satz von mehreren Paaren von Referenz-Pinhole und Signaldurchlassöffnung, z.B. in verschiedenen Bereichen auf einer gemeinsamen Lochmaske oder auf je einer eigenen Lochmaske, mit verschiedenen Abständen von Referenz-Pinhole und Signaldurchlassöffnung, um das optische System in verschiedenen Teilbereichen des Erfassungsbereichs bzw. der Pupille mit verschiedenen solchen Lochpaaren zu vermessen. Mit

di ser Maßnahm kann die M ssbereichsdynamik des Punktbeugungsinterferometers unter Belb haltung einer hohen Messgenauigkeit g steig rt werden.

- 5 In einem weiteren Aspekt umfasst die Erfindung ein Verfahren zur optischen Vermessung eines optischen Systems, das eine Detektion von Messstrahlung, die vom optischen System kommt, sowie eine Ermittlung und rechnerische Korrektur eines Verzeichnungsfehlers der Messstrahlung umfasst. Durch den Schritt zum Ermitteln und
- 10 rechnerischen Korrigieren des Verzeichnungsfehlers kann dessen Einfluss auf die Ergebnisse der Vermessung des optischen Systems ganz oder teilweise eliminiert werden. Dies umfasst sowohl Anwendungen, in denen trotz Verwendung einer verzeichnungskorrigierenden Optik in einer verfahrensdurchführenden Vermessungsvorrichtung ein
- 15 gewisser Verzeichnungsfehler verbleibt, als auch Anwendungen, in denen eine relativ einfache Vermessungsoptik verwendet und dafür ein entsprechender, rechnerisch zu korrigierender Verzeichnungsfehler in Kauf genommen wird. Die Ermittlung des Verzeichnungsfehlers kann z.B. durch Berechnen einer Verzeichnungstransformation unter Verwen-
- 20 dung einer Berechnung des optischen Strahlverlaufs, z.B. durch einen entsprechenden Raytracing-Algorithmus, durch eine interferometrische Verzeichnungsfehlermessung mittels Einbringen von Referenzmustern in eine Pupille oder pupillennahe Ebene eines vermessenen optischen Abbildungssystems oder in eine dazu konjugierte Ebene oder durch eine
- 25 Moire-Messtechnik erfolgen. Eine weitere vorteilhafte Verzeichnungsfehlerbestimmung beinhaltet einen Vergleich von Ist- und Sollpositionen von Interferenzstreifen eines erzeugten und detektierten Interferenzmusters bei Änderung eines oder mehrerer äußerer Parameter. Die Änderung des einen oder der mehreren äußeren Parameter umfasst
- 30 Insbesondere eine Änderung der Position einer Maskenstruktur und/oder einer Detektoranordnung der Vermessungsvorrichtung parallel zur optischen Hauptachse des Systems, eine Änderung der benutzten

Wellenlänge und/oder eine Änderung der Aberrationen des vermessenen optischen Systems, z.B. durch Verstellen von vorhandenen xy-und/oder z-Manipulatoren für zugehörige Komponenten des vermessenen Systems. Bevorzugt wird nach Ermittlung der den Verzeichnungsfehler beschreibenden Verzeichnungstransformation die Verzeichnung durch Anwenden der inversen Verzeichnungstransformation korrigiert.

Das erfindungsgemäße Verfahren ist für die verschiedensten Vermessungstechniken einsetzbar, insbesondere für die Vermessung durch laterale Scherinterferometrie und durch Punktbeugungsinterferometrie. Die Benutzung des verzeichnungskorrigierenden Verfahrens ermöglicht auf Wunsch die Verwendung einer vereinfachten Optik für die Vermessungsvorrichtung. Außerdem ermöglicht das Verfahren eine Qualifizierung der Güte der eingesetzten Vermessungsoptik, wie z.B. einer detektorseitigen Abbildungsoptik.

In vorteilhaften Weiterbildungen der Erfindung wird eine interferometrische Wellenfrontvermessung des zu vermessenden optischen Systems mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung, d.h. unter Verwendung des Dynamikbereich-Korrekturlements und/oder eines Satzes von mehreren Beugungsstrukturen unterschiedlicher Periodenlängen bei der lateralen Scherinterferometrie und/oder eines Satzes von mehreren bildseitigen Lochmaskenstrukturen mit unterschiedlichen Abständen von Referenz-Pinhole und Signaldurchlassöffnung bei der Punktbeugungsinterferometrie, jeweils für verschiedene Erfassungsbereich-Teilbereiche, durchgeführt und ein etwaiger Verzeichnungsfehler durch das erfindungsgemäße Verfahren der Verzeichnungsfehlerermittlung bestimmt und korrigiert.

Vorteilhafte Ausführungsbeispiele der Erfindung sind in den Zeichnungen dargestellt und werden nachfolgend beschrieben. Hierbei zeigen:

- Fig. 1 ein Diagramm des typischen Verlaufs einer interferierenden Wellenfront entlang einer Detektorflächenrichtung auf Höhe einer Detektorebene für je ein Vermessungsvorrichtung vom Typ S-BIF und K-BIF bei Vermessung eines speziellen Mikrolithographie-Projektionsobjektivs,
- 5
- Fig. 2 ein Diagramm des Verlaufs des Gradienten für die beiden Wellenfrontverläufe von Fig. 1,
- 10
- Fig. 3 ein Diagramm des Verlaufs der zweiten Ableitung der beiden Wellenfrontverläufe von Fig. 1,
- Fig. 4 eine schematische Seitenansicht eines interessierenden Teils einer Vermessungsvorrichtung vom Typ K-BIF mit einem asphärischen Linsenelement als Dynamikbereich-Korrekturelement,
- 15
- Fig. 5 eine schematische Seitenansicht entsprechend Fig. 4, jedoch mit einem CGH-Element als Dynamikbereich-Korrekturelement,
- 20
- Fig. 6 eine Detailansicht von Fig. 5 mit dem CGH-Element und einer Beugungsgitterstruktur auf einem gemeinsamen Träger,
- Fig. 7 eine schematische Seitenansicht eines interessierenden Teils einer Vermessungsvorrichtung vom Typ S-BIF mit zusätzlichen Linsenelementen zur Parallelisierung des Strahlverlaufs für das zu vermessende optische System,
- 25
- Fig. 8 ein Diagramm zur Veranschaulichung eines Phasenmodulationsverlaufs einer zu detektierenden, interferierenden Wellenfront auf Höhe einer Detektorebene bei Vermessung eines Mikrolithographie-Projektionsobjektivs mit einer S-BIF-Vermessungsvorrichtung unter Verwendung mehrerer verschiedener Beugungsstruktur-
- 30

perioden für verschiedene Scherabstände im Vergleich zur Verwendung von nur einer Beugungsstrukturperiode und

- Fig. 9 eine schematische Seitenansicht eines interessierenden Teils einer Vermessungsvorrichtung vom Punktbeugungsinterferometertyp, bei der zur Steigerung der Messbereichsdynamik detektorseitig mehrere Paare von Referenz-Pinhole und Signaldurchlassöffnung mit unterschiedlichen Abständen verwendet werden.
- 10 Bekanntermaßen wird bei der Vermessung eines optischen Abbildungssystems durch eine laterale Scherinterferometertechnik für ein jeweiliges Pixel (n, m) innerhalb einer Pupille des Abbildungssystems durch das laterale Phasenschieben, d.h. die laterale Relativbewegung von objektseitiger Maskenstruktur und bildseitiger Beugungsgitterstruktur,
- 15 eine Intensitätsmodulation des gebildeten Wellenfront-Interferenzmusters bewirkt, die proportional zu einer Kosinusfunktion ist, deren Argument gleich der Summe einer ortsunabhängigen Phasendifferenz zwischen Maske und Beugungsgitter und einer von der Ortskoordinate (x_n, y_m) des betrachteten Pupillenpunktes (n, m) abhängigen Phasendifferenz $\Delta\phi(x_n, y_m)$ zwischen zwei verschiedenen, interferierenden
- 20 Beugungsordnungen ist, z.B. einer 0. und einer +1. Beugungsordnung. Bei einer phasenschiebenden Scherbewegung z.B. in einer x-Richtung ergibt sich diese Phasendifferenz $\Delta\phi(x_n, y_m)$ durch die Beziehung

$$25 \quad \Delta\phi(x_n, y_m) = \phi(x_n + s, y_m) - \phi(x_n, y_m),$$

- wobei ϕ die Wellenfrontphase in der Pupillenebene und s den Scherabstand bezeichnen, für den die Beziehung $s = \lambda f / \Lambda$ gilt, wobei λ die benutzte Wellenlänge, f die Brennweite des Abbildungssystems und Λ
- 30 die Gitterperiode des Beugungsgitter bezeichnen.

- Wie oben erwähnt, wird bei der Vermessungsvorrichtung vom Typ S-BIF die Pupille unverzerrt auf einer Detektorfläche z.B. einer CCD-Kamera gemessen, während beim Typ K-BIF die Pupille verzerrt gemessen wird. Es lässt sich für das K-BIF jedoch der Zusammenhang zwischen
- 5 Pupillenkoordinaten und Detektorflächenkoordinaten numerisch oder in bestimmten Fällen auch analytisch bestimmen. Die Vermessungsvorrichtungen, die mit lateraler Scherinterferometrie arbeiten, wie das BIF, erfassen durch die Detektion und Auswertung des Wellenfront-Interferenzmusters nicht direkt die Wellenfront für das vermessene
- 10 System, sondern deren erste räumliche Ableitung. Deren Variation, d.h. die Größe der zweiten partiellen räumlichen Ableitungen der Wellenfront, bestimmt und begrenzt den Messbereich, in welchem die Vermessungsvorrichtung eingesetzt werden kann, vorliegend daher auch Dynamikbereich bezeichnet. Es zeigt sich, dass ein verwendbarer
- 15 Dynamikbereich z.B. dadurch definiert werden kann, dass für alle enthaltenen Wellenfrontpunkte die Bedingung

$$\max \left(\frac{d^2 \varphi(x, y)}{dx^2} \Delta x \cdot s, \frac{d^2 \varphi(x, y)}{dy^2} \Delta y \cdot s \right) < q \cdot 2 \cdot \pi$$

- 20 für die zweiten partiellen räumlichen Ableitungen der Wellenfrontphase erfüllt ist, wobei Δx und Δy die Ausdehnung eines Pixels und q einen insbesondere durch das benutzte Auswerteverfahren bedingten Grenzwert bezeichnen, der z.B. typischerweise in der Größenordnung von 0,25 liegen kann. Das in die obige Beziehung eingehende Produkt aus
- 25 zweiter Wellenfrontableitung, Pixelabmessung und Scherabstand wird auch als Phasenmodulation bezeichnet.

- In den Fig. 1 bis 3 sind diese Verhältnisse diagrammatisch für ein spezielles Beispiel der Vermessung eines Mikrolithographie-Projektions-
- 30 objektivs mit sphärischer Aberration und einer numerischen Apertur von etwa 0,9 veranschaulicht, und zwar zu Vergleichszwecken zum einen für

ine Vermessungsvorrichtung vom Typ S-BIF und zum anderen für eine solche vom Typ K-BIF. Dabei ist in den Diagrammen der Fig. 1 bis 3 auf der Abszisse jeweils eine Pupillenkoordinate, z.B. diejenige in x-Richtung, normiert auf ein Intervall $[-1, +1]$ aufgetragen. Wie Fig. 1 zeigt, steigt der in Wellenlängeneinheiten auf der Ordinate abgetragene Wellenfrontverlauf in beiden Fällen zum Pupillenrand hin stark an, für das S-BIF jedoch später, siehe zugehörige Kurve 1, als für das K-BIF, siehe zugehörige Kurve 2. Fig. 2 zeigt in entsprechenden Kennlinien 3 und 4 qualitativ den zugehörigen Verlauf der ersten räumlichen Ableitung der beiden Kurvenverläufe 1, 2 von Fig. 1 für das S-BIF bzw. das K-BIF. Fig. 3 zeigt in entsprechenden Kennlinien 5 und 6 den zum Gradienten der beiden Kurven 3 und 4 aus Fig. 2 proportionalen Verlauf der Wellenfront-Phasenmodulation entlang der betreffenden Richtung für das S-BIF bzw. das K-BIF.

15

Wie aus Fig. 3 zu erkennen, steigt in diesem speziellen Beispiel die zweite Ableitung 5 für das S-BIF zum Pupillenrand hin relativ stark an und überschreitet den oben erwähnten Grenzwert von z.B. $2\pi q = 2\pi/4$, was $\lambda/4$ entspricht, während die zweite Ableitung 6 für das K-BIF innerhalb dieser Schranke bleibt. Somit nutzt in diesem speziellen Beispiel das K-BIF den Dynamikbereich der Vermessungsvorrichtung über eine größere Anzahl von Detektorflächenpixeln aus als das S-BIF. Die bessere Ausnutzung des Dynamikbereichs führt in der Regel auch zu einer besseren Absolutmessgenauigkeit und einer besseren Reproduzierbarkeit bei einer Wiederholungsmessung. Für andere Anwendungsbeispiele, z.B. andere vermessene Objektive mit anderen Objektivparametern, wird die Vermessung im allgemeinen zu anderen Resultaten hinsichtlich der Ausnutzung des Dynamikbereichs führen. Je nach Fall kann dabei das K-BIF, wie im Beispiel von Fig. 3, oder das S-BIF einen größeren nutzbaren Dynamikbereich haben.

30

In den Fig. 4 bis 6 sind Zusatzmaßnahmen veranschaulicht, mit denen sich durch Einsatz eines Dynamikbereich-Korrekturelements bei der Vermessungsvorrichtung vom K-BIF-Typ der nutzbare Dynamikbereich steigern lässt.

5

- Das in Fig. 4 gezeigte K-BIF ist von einem üblichen Aufbau zur Vermessung z.B. eines Mikrolithographie-Projektionsobjektivs 7. Speziell beinhaltet das K-BIF von Fig. 4 ein Maskenelement 8 mit einer in einer Objektebene des Objektivs 7 positionierbaren Maskenstruktur, einen transparenten Substratträger 9, auf dessen Vorderseite eine übliche Beugungsgitterstruktur 10 ausgebildet ist, die in einer Bildebene des vermessenen Objektivs 7 positioniert wird, und eine Detektoranordnung 11, z.B. eine CCD-Kamera. An die Detektoranordnung 11 schließt sich eine Auswerteeinheit 13 an, welche die von der Detektoranordnung 11 gelieferte Detektionsinformation auswertet, um die Wellenfront für das vermessene Objektiv 7 rechnerisch zu rekonstruieren und damit eine Aussage über die Abbildungsqualität bzw. Abbildungsfehler des Objektivs 7 machen zu können.
- 20 Auf der Rückseite des Substratträgers 9 ist ein asphärisches Linsenelement 12 angebracht, das speziell als Dynamikbereich-Korrekturelement ausgelegt ist. Dies bedeutet, dass das Design dieses asphärischen Linsenelementes 12 so berechnet und realisiert ist, dass es den Wellenfrontstrahlverlauf im Sinne einer Erhöhung des Dynamikbereichs beeinflusst, d.h. das asphärische Linsenelement 12 ist so ausgelegt, dass es zu einer Vergleichmäßigung des Verlaufs der zweiten partiellen räumlichen Ableitungen des Wellenfrontverlaufs innerhalb einer Pupille des vermessenen Objektivs 7 sorgt. Im Vergleich zu einem K-BIF mit herkömmlichem Aufbau ohne das asphärische Linsenelement 12 besitzt folglich das K-BIF von Fig. 4 einen größeren Dynamikbereich mit den oben genannten Vorteilen, die sich aus der damit bewirkten, möglichst
- 25
30

gleichmäßigen Verteilung des Dynamikbereichs innerhalb eines betrachteten Erfassungsbereichs, wie der Pupille des Objektivs 7, ergeben.

Fig. 5 zeigt ein K-BIF als Variante der Vorrichtung von Fig. 4, wobei das
5 K-BIF von Fig. 5 statt des asphärischen Linsenelements 12 von Fig. 4 ein computergeneriertes Hologramm-Element (CGH-Element) 12a als Dynamikbereich-Korrekturelement beinhaltet. Ansonsten entspricht das K-BIF von Fig. 5 demjenigen von Fig. 4, wobei zur Verdeutlichung für funktionell äquivalente, nicht zwingend identische Komponenten gleiche
10 Bezugszeichen gewählt sind. Es versteht sich, dass das K-BIF von Fig. 4 oder von Fig. 5 je nach Anwendungsfall weitere, nicht gezeigte Komponenten umfassen kann, die hier nicht weiter interessieren.

Das CGH-Element ist analog zu den obigen Erläuterungen bezüglich
15 des asphärischen Linsenelements 12 von Fig. 4 so ausgelegt, dass es den Dynamikbereich der Vermessungsvorrichtung, der durch die zweiten partiellen räumlichen Wellenfrontableitungen bestimmt wird, innerhalb der Pupille des vermessenen Objektivs 7 möglichst gleichmäßig verteilt, so dass es den nutzbaren Dynamikbereich steigert. Das
20 CGH-Element kann in einer für die Herstellung solcher optischen Elemente üblichen Weise erzeugt werden, wobei für die gewünschte Wirkung als Dynamikbereich-Korrekturelement einige spezielle Auslegungs- bzw. Designschritte verwendet werden, auf die nachfolgend unter Bezugnahme auf Fig. 6 näher eingegangen wird.

25

Fig. 6 zeigt detaillierter, dass in diesem Beispiel die Beugungsgitterstruktur 10 und das CGH-Element 12a gemeinsam auf dem transparenten Substratträger 9 angebracht sind, und zwar die Beugungsgitterstruktur 10 auf seiner Vorderseite, in Fig. 6 oben, und das CGH-
30 Element 12a auf seiner Rückseite, in Fig. 6 unten. Interferierende Wellenfrontstrahlung 14 wird an der Beugungsgitterstruktur 10 gebeugt, tritt durch den transparenten Substratträger 9 hindurch und wird dann

vom CGH-Element 12a im Sinn einer Steigung des Dynamikbereichs beeinflusst, bevor sie auf eine sensitive Detektorfläche 11a der Detektoranordnung fällt und dort als Interferenzmuster detektiert wird. Bevorzugt wird für den Substratträger 9 ein Material mit geringer Absorption und guten mechanischen Eigenschaften, insbesondere hoher Stabilität, verwendet. Der Einfachheit halber beschränkt sich die nachstehende Erläuterung der Schritte für das Design des CGH-Elements 12a auf eine Dimension, d.h. eine x-Koordinate, und einen symmetrischen Verlauf der Wellenfront, wie z.B. bei Defokuseffekten und sphärischen Aberrationen. Die Vorgehensweise ist in entsprechend modifizierter Form auch für den zweidimensionalen Fall geeignet. Zum besseren Verständnis sind in Fig. 6 eine x'-Koordinate in einer Ebene vor dem Substratträger 9, eine x''-Koordinate in einer Ebene hinter dem Substratträger 9 und eine x'''-Koordinate in einer Ebene der Detektorfläche 11a angegeben.

Zunächst werden für das Design des CGH-Elements 12a Zielphasen $\Delta\phi_p$ in der Ebene der Detektorfläche 11a anhand der Beziehung

$$\Delta\phi_p = 2\Delta\phi_{\max} \left| p/P - 0,5 \right|, \text{ mit } 0 \leq p \leq P$$

gewählt. Dabei ist $\Delta\phi_{\max}$ der erreichbare Maximalwert der Phase, während P die Anzahl an Detektorflächenpixel entlang der x'''-Koordinate und p die Pixellaufvariable bezeichnen. Anschließend werden Stützstellen x'' in der Ebene hinter dem Substratträger 9, d.h. auf Höhe des CGH-Elements 12a, berechnet, die die Bedingung $\Delta\phi_p(x'') = \Delta\phi_p$ erfüllen. In einem nächsten Schritt werden Stützstellen x''' mit $\Delta\phi_p(x''') = pX/P - X/2$ in der Detektorflächenebene definiert, wobei X der angenommene Durchmesser der Wellenfrontstrahlung auf der Ebene der Detektorfläche 11a ist. Dann wird die Struktur des CGH-Elements so berechnet, dass mit ihr die Stützstellen in der x''-Ebene des CGH-Elements in die Stützstellen in der x'''-Ebene der Detektorfläche

11a überführt werden. Dazu kann die lokale variierende Gitterperiode Λ_L aus der nachstehenden Beziehung wie folgt berechnet werden:

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\sin(\arctan(x_p^+ / s_1)) - \sin(\arctan((x_p^- - x_p^+) / s_2))} ,$$

5

wobei s_1 die Dicke des Substratträgers 9 und s_2 den Abstand zwischen Substratträger 9 bzw. CGH-Element 12a und Detektorfläche 11a bezeichnen, wie in Fig. 6 angegeben.

- 10 Fig. 7 zeigt eine Vermessungsvorrichtung vom S-BIF-Typ, speziell in einer Auslegung zur Vermessung einer asphärischen Linse 7a. Das S-BIF von Fig. 7 umfasst zur verbesserten Vermessung der asphärischen Linse 7a eine dieser vorgeschaltete Linse 15 und eine ihr nachgeschaltete Linse 16. Die beiden Zusatzlinsen 15, 16 stellen einen parallel-
- 15 Islierten Strahlengang 17 zur Verfügung, in welchem sich die zu prüfende asphärische Linse 7a befindet. Des weiteren beinhaltet das S-BIF wie üblich ein objektseitiges Maskenstrukturelement 8a mit einer in einer Objektebene des Systems zu positionierenden Maskenstruktur, ein bild-
- 20 seitiges Beugungsstrukturelement mit einer in einer Bildebene des Systems anzuordnenden Beugungsgitterstruktur und ein nachgeschaltetes Mikroskopobjektiv 18 zur Fernfeldabbildung des Wellenfront-Interferenzmusters auf die Detektorfläche einer Detektoranordnung 11a, deren Detektionsinformationen von einer nachgeschalteten Auswerteeinheit
- 25 13a zwecks Rekonstruktion der Wellenfront für die zu prüfende Linse 7a ausgewertet werden. Zur Bestimmung der Aberrationen der zu prüfenden Linse 7a werden die Aberrationen des aus den beiden Zusatzlinsen 15 und 16 gebildeten Optiksystems herausgerechnet.

- Die Erfindung umfasst des weiteren die Bereitstellung einer mit lateraler
- 30 Scherinterferometrie arbeitenden Vermessungsvorrichtung, bei welcher der Dynamikbereich durch die Verwendung mehrerer Masken-/Beugungsstrukturen mit unterschiedlichen Periodenlängen und daher

unterschiedlichen Scherabständen erweitert wird. Dabei werden für verschiedene Bereiche einer Pupille eines zu vermessenden Abbildungssystems mehrere Kombinationen von Maskenstrukturen und Beugungsstrukturen benutzt, bei denen die Beugungsstrukturen unterschiedliche Periodenlängen haben, was dementsprechend unterschiedlichen Scherabständen entspricht. Mit größerer Beugungsstruktur-Periodenlänge verkleinert sich der Scherabstand, wodurch die oben angegebene Dynamikbedingung höhere Werte für die zweiten partiellen räumlichen Ableitungen der Wellenfrontphase erlaubt. Auf diese Weise ist es möglich, die Wellenfrontmodulation über die gesamte Pupille hinweg unter dem vorgegebenen Grenzwert von z.B. $\lambda/4$ zu halten. Im Übrigen ist ein üblicher Aufbau der Vermessungsvorrichtung verwendbar, z.B. vom S-BIF-Typ gemäß Fig. 7 mit oder ohne die dortigen Zusatzlinsen 15, 16 oder vom K-BIF-Typ gemäß Fig. 4.

15

Fig. 8 veranschaulicht diagrammatisch ein derartiges Ausführungsbeispiel, bei dem der Dynamikbereich für eine Vermessungsvorrichtung vom S-BIF-Typ durch Verwendung von drei unterschiedlichen Masken-/Beugungsstrukturen erweitert wird. Als Vergleichsbeispiel dient das zu den Fig. 1 bis 3 oben erläuterte S-BIF, das mit einer festen Beugungsstruktur-Periodenlänge und folglich einem einzigen Scherabstand, im Insert von Fig. 8 auch als Scherkonstante bezeichnet, arbeitet und zu dem die Kennlinie 5 entsprechend Fig. 3 gehört, die zum Pupillenrand hin den vorgegebenen Grenzwert von z.B. $\lambda/4$ überschreitet.

25

Speziell benutzt das S-BIF gemäß Fig. 8 innerhalb eines größeren Pupillenmittenbereichs P1, dessen normierte Pupillenkoordinate sich etwa von -0,75 bis +0,75 erstreckt, eine Beugungsgitterstruktur mit einer ersten Periodenlänge und eine Maskenstruktur mit korrespondierender Periodenlänge, so dass mit dem zugehörigen Scherabstand die Phasenmodulation auch zum Randbereich dieses Pupillenkoordinatenintervalls P1 hin den vorgegebenen Grenzwert von z.B. $\lambda/4$ noch nicht über-

30

schreitet, sieht die zugehörige Phasenmodulationskurve 19. In einem nach außen anschließenden Pupillenbereich P2 benutzt das S-BIF gemäß Fig. 8 eine zweite Beugungsgitterstruktur mit einer gegenüber der ersten größeren zweiten Periodenlänge und eine zweite Maskenstruktur mit dazu korrespondierender Periodenlänge. Die gegenüber der ersten größere zweite Beugungsstruktur-Periodenlänge bedeutet eine gegenüber der ersten, für den Pupillenmittenbereich P1 verwendeten Scherkonstanten geringere zweite Scherkonstante und ist so gewählt, dass die zugehörige Phasenmodulationskurve 20 innerhalb des zugehörigen Pupillenteilbereichs P2 unter der vorgegebenen Grenze von z.B. $\lambda/4$ bleibt, wie in Fig. 8 dargestellt. In einem äußeren Pupillenteilbereich P3 benutzt das S-BIF gemäß Fig. 8 eine dritte Kombination von Beugungs- und Maskenstruktur mit einer gegenüber der zweiten größeren dritten Beugungsstruktur-Periodenlänge und korrespondierender Maskenstruktur-Periodenlänge und folglich mit einer gegenüber der zweiten kleineren dritten Scherkonstanten. Dies führt dazu, dass sich auch in diesem äußeren Pupillenteilbereich P3 die Phasenmodulation, die proportional zum Produkt aus zweiter Wellenfrontableitung und Scherabstand ist, wie anhand der obigen Dynamikbereichbedingung erläutert, unter dem vorgegebenen Grenzwert von z.B. $\lambda/4$ halten lässt. Die drei verschiedenen Scherkonstanten für das S-BIF gemäß Fig. 8 können z.B. im Verhältnis 1:2:3 gewählt werden, d.h. die zweite Scherkonstante für den Pupillenteilbereich P2 ist halb so groß wie die erste Scherkonstante für den Pupillenmittenbereich P1, und die dritte Scherkonstante für den äußeren Pupillenteilbereich P3 ist nur ein Drittel so groß wie die erste Scherkonstante.

Insgesamt werden durch einen Vermessungsvorgang mit dem S-BIF gemäß Fig. 8 drei Wellenfrontteilbereiche für die drei Pupillenteilbereiche P1, P2 und P3 erhalten, die dann zur Rekonstruktion der gesamten Wellenfront miteinander kombiniert werden, wozu die Wellenfrontteilbereiche insbesondere an den Übergängen aneinander

angepasst werden. Dazu werden beispielsweise mittels eines an sich herkömmlichen Anpassungsalgorithmus die durch den Schervorgang erhaltenen Wellenfrontteilbereiche in den einzelnen Pupillenteilbereichen P1, P2 und P3 durch einen vorgebbaren Funktionensatz mit freien Koeffizienten approximiert, die dann durch die Methode kleinster Fehlerquadrate oder ein anderes herkömmliches Anpassungsverfahren bestimmt werden, so dass die gesuchte, aus dem Schervorgang resultierende Wellenfront für den gesamten Pupillenbereich, d.h. den gesamten Erfassungsbereich, erhalten wird.

Fig. 9 zeigt schematisch eine mit Punktbeugungsinterferometrie arbeitende Vermessungsvorrichtung, deren Dynamikbereich analog zum obigen S-BIF-Beispiel von Fig. 8 durch Verwendung unterschiedlicher detektorseitiger Lochmaskenstrukturen erweitert wird. Die Punktbeugungsinterferometer(PDI)-Vorrichtung von Fig. 9 dient der Vermessung eines optischen Abbildungssystems 30, z.B. eines Mikrolithografie-Projektionsobjektivs, und ist von einem hierzu üblichen Aufbau mit einer Quelle 31 für Messstrahlung, z.B. ein Beleuchtungssystem einer Mikrolithografie-Projektionsbelichtungsanlage, der im Strahlengang der Messstrahlung bis zum zu vermessenden Abbildungssystem 30 eine Streuscheibe 32, eine Spotlinse 33, eine Pinholemaske 34 und ein strahlteiles Element, hier ein Beugungsgitter 35, folgen. Die Streuscheibe 32 stellt räumlich ausreichend inkohärente Strahlung bereit. Die Pinholemaske 34 weist ein sogenanntes Pinhole auf, worunter vorliegend eine Öffnung von so kleinem Durchmesser verstanden wird, dass selbige als Punktlichtquelle für die Messstrahlung wirkt. Das Beugungsgitter 35 spaltet die von der Pinholemaske 34 erzeugte sphärische Welle durch Beugung in eine Messsignalwelle 36 und eine Referenzwelle 37 auf. Die beiden Teilwellen durchlaufen das zu vermessende Abbildungssystem 30 auf ähnlichen Trajektorien.

Im Strahlengang hinter dem Abbildungssystem 30 ist eine detektorseitige Lochmaske 38, vorzugsweise in oder nahe der Bildebene des Abbildungssystems 30, angeordnet, die ein Referenz-Pinhole 39 und eine Signaldurchlassöffnung 40 aufweist. Vom Abbildungssystem 30 wird die Referenzwelle 37 auf das Referenz-Pinhole 39 abgebildet, so dass von diesem eine sphärische Referenzwelle 41 ausgeht. Die Signaldurchlassöffnung 40 ist mit vorgebbarem Abstand zum Referenz-Pinhole angeordnet und weist einen gegenüber dem Pinhole größeren Durchmesser derart auf, dass die vom Abbildungssystem 30 auf sie fokussierte Messsignalwelle 36 ohne signifikanten Beugungseffekt als Messsignalwelle 42 hindurchtreten kann. Die Messsignalwelle 42 interferiert mit der zu ihr kohärenten Referenzwelle 41, und aus dem entstehenden Interferenzmuster kann die gewünschte Vermessungsinformation gewonnen werden. Zur Detektion wird das Interferenzmuster mittels eines Mikroskopobjektivs 43 auf einen Detektor 44, z.B. eine CCD-Kamera, abgebildet. Zur Steigerung der Messgenauigkeit kann die Methode der Phasenschiebung verwendet werden, bei der das Beugungsgitter 35 mittels einer zugehörigen Aktuatoreinheit 45 lateral verschoben wird.

20

Zur Erweiterung der Messbereichsdynamik ist für die PDI-Vorrichtung von Fig. 9 ein Satz von mehreren Paaren von Referenz-Pinhole 39 und Signaldurchlassöffnung 40 mit unterschiedlichen Abständen zwischen dem Referenz-Pinhole 39 und der Signaldurchlassöffnung 40 vorgesehen. Diese Mehrzahl von Lochpaaren mit unterschiedlichem Abstand von Referenz-Pinhole 39 und Signaldurchlassöffnung 40 können in verschiedenen Bereichen eines einzigen Lochmaskenelements 38 vorgesehen sein, oder es werden alternativ mehrere austauschbare Lochmaskenelemente 38 verwendet, die jeweils ein oder mehrere solche Lochpaare aufweisen. Analog zur oben erläuterten Verwendung verschiedener Masken-/Beugungsstrukturen mit unterschiedlichen Periodenlängen bei der lateralen Scherinterferometrie ermöglicht die

30

Verwendung mehrerer Paare von Referenz-Pinhole 39 und Signaldurchlassöffnung 40 mit unterschiedlichen Lochabständen eine Anpassung der Dynamikmodulation an den jeweiligen Wellenfrontbereich. Mit anderen Worten können z.B. in einer Situation entsprechend Fig. 8 für den Pupillenmittenbereich P1 ein erstes Paar von Referenz-Pinhole 39 und der Signaldurchlassöffnung 40 mit einem ersten Lochabstand, für den nach außen anschließenden Pupillenteilbereich P2 ein zweites Lochpaar mit einem gegenüber dem ersten kleineren zweiten Lochabstand und für den äußeren Pupillenteilbereich P3 ein drittes Lochpaar mit einem gegenüber dem zweiten kleineren dritten Lochabstand benutzt werden. Es ergibt sich dadurch ein analoger, die Messbereichsdynamik steigender Effekt, wie er oben zu Fig. 8 erläutert wurde. Selbstverständlich können je nach Bedarf auch nur zwei oder mehr als drei solche Lochpaare mit unterschiedlichen Lochabständen verwendet werden.

Es versteht sich, dass die zu den Figen 8 und 9 erläuterte Methode der Verwendung mehrerer Beugungsstrukturen mit unterschiedlicher Periodenlänge bei der Scherinterferometrie bzw. mehrerer Paare von Referenz-Pinhole und Signaldurchlassöffnung mit unterschiedlichen Abständen bei der Punktbeugungsinterferometrie mit der zu den Fig. 4 bis 6 erläuterten Methode der Verwendung eines Dynamikbereich-Korrekturlements kombiniert werden kann, um den Dynamikbereich einer mit lateraler Scherinterferometrie bzw. Punktbeugungsinterferometrie arbeitenden Vermessungsvorrichtung zu erhöhen. Bei der erstgenannten Methode wird die Phasenmodulation in Bereichen mit höherer zweiter Wellenfrontableitung durch Benutzen von angepasst kleineren Scherabständen bzw. angepasst kleineren Abständen von Referenz-Pinhole und Signaldurchlassöffnung ausreichend niedrig gehalten, während bei der letztgenannten Methode durch die Wirkung des Dynamikbereich-Korrekturlements die zweite Wellenfrontableitung verringert wird. Als Dynamikbereich-Korrekturlement ist außer einer

asphärischen Linse und einem CGH-Element auch in anderes, geeignet ausgelegtes diffraktives optisches Element (DOE) einsetzbar.

5 Während beim S-BIF durch Verwendung einer speziellen detektorseitigen Abbildungsoptik, wie eines Mikroskopobjektivs und bei Bedarf einer Relaisoptik, das erzeugte Wellenfront-Interferenzmuster sinuskorrigiert in das Fernfeld auf den Detektor abgebildet wird und somit schon in hohem Maß verzeichnungskorrigiert ist, wird beim K-BIF keine derartige, komplexe Messoptik verwendet und stattdessen eine Verzeichnung in
10 Kauf genommen, wie oben erläutert. Bei Verwendung des Dynamikbereich-Korrekturlements hängt die Verzeichnung auch von diesem ab. Je nach verwendetem Detektionssystem trägt eventuell auch dieses zum Verzeichnungsfehler bei. Für diese Vermessungsvorrichtungen ist eine korrektive bzw. kalibrierende Berücksichtigung von Verzeichnungs-
15 fehler wünschenswert. Die Erfindung umfasst die Maßnahme, bei Bedarf den Verzeichnungsfehler für die Vermessungsvorrichtung rechnerisch und/oder messtechnisch in spezieller Weise zu bestimmen und bei der Wellenfrontrekonstruktion zu berücksichtigen. Hierzu bieten sich mehrere Vorgehensweisen an.

20

Ein erstes Verfahren zur Verzeichnungskorrektur beinhaltet eine rechnerische Bestimmung einer Verzeichnungstransformation, d.h. einer mathematischen Transformationsfunktion, welche den Verzeichnungsfehler von z.B. einer Pupillenebene eines vermessenen optischen
25 Abbildungssystems auf die Ebene der Detektorfläche abbildet, mittels optischer Durchrechnung. Hierfür können an sich bekannte optische Rechenverfahren benutzt werden, wie das sogenannte Raytracing. Die für die Berechnung erforderlichen geometrischen Ausgangsgrößen, wie Abstände, Radian etc., können für die Einzelkomponenten mechanisch
30 oder mit Hilfe optischer Messtechnik bestimmt werden. Nach erfolgter Berechnung der Verzeichnungstransformation kann die systembedingte Verzeichnung durch Anwenden der inversen Verzeichnungstransforma-

tion auf das detektierte Wellenfront-Interferenzmuster bzw. die daraus gewonnenen Wellenfrontableitungen korrigiert werden.

Ein zweites Verzeichnungs-korrekturverfahren beinhaltet das Einbringen
5 von vorgegebenen Referenzmustern in eine Pupille oder pupillennahe Ebene eines vermessenen optischen Abbildungssystems oder in oder nahe einer dazu konjugierten Ebene, wie in eine pupillennahe Ebene eines Beleuchtungssystems, das einem vermessenen Projektionsobjektiv einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage vorge-
10 schaltet ist. Das jeweilige Referenzmuster wird dann durch das vermessene Abbildungssystem und die optional vorhandene detektorseitige Abbildungsoptik der Vermessungsvorrichtung auf die Detektorfläche abgebildet, so dass der Verzeichnungsfehler der Vermessungsvorrichtung auf einem Vergleich des Bildes des Referenzmusters auf der
15 Detektorfläche mit dem originalen Referenzmuster ermittelt werden kann. Dies setzt voraus, dass die Verzeichnung des zu vermessenden Systems bekannt ist oder vernachlässigt werden kann. Mittels Austausch des Substratträgers, der die bildseitige Beugungsstruktur trägt, durch ein unbeschichtetes Substrat ist bei Bedarf eine
20 Verzeichnungsmessung in-situ möglich.

Ein drittes mögliches Verfahren zur Verzeichnungsfehlerkorrektur besteht darin, die Verzeichnung mit Hilfe einer Moiré-Messtechnik zu bestimmen. Dazu wird eine erste Moiré-Struktur in eine Pupille oder
25 pupillennahe Ebene eines vermessenen optischen Abbildungssystems oder eine dazu konjugierte Ebene und eine zweite Moiré-Struktur im Strahlengang hinter dem vermessenen System angeordnet und die Moiré-Überlagerungsstruktur mit dem Detektor erfasst. Bei bekannter Verzeichnung des vermessenen Systems kann daraus dann der
30 Verzeichnungsfehler für die Vermessung bestimmt werden. Auch bei diesem Verfahren ist mittels Austausch des im Vermessungsvorgang die

Beugungsstruktur tragend n Substratträger durch ein nicht beschichtetes Substrat eine Verzeichnungsmessung in-situ möglich.

Ein viertes Verfahren zur Verzeichnungskorrektur besteht darin, eine
5 Verzeichnungsfunktion durch Soll-Ist-Vergleich von Interferenzstreifen
eines erzeugten Interferenzmusters zu berechnen, d.h. die tatsächliche
(Ist-)Lage von Interferenzstreifen auf der Detektorfläche mit rechnerischen Sollpositionen in mehreren verschiedenen Messeinstellungen zu
10 vergleichen. Dabei werden für die verschiedenen Messeinstellungen ein
oder mehrere äußere Parameter geändert, um auf diese Weise den
Fehler bei der Berechnung der Verzeichnungstransformation zu minimieren. Die Änderung des oder der äußeren Parameter beinhaltet z.B.
eine Änderung der z-Position, d.h. der axialen Position entlang einer
optischen Hauptachse des Systems, der Detektoranordnung und/oder
15 eines objektseitigen Maskenstrukturelements, eine Änderung der benutzten Wellenlänge und/oder eine Änderung der Aberrationen eines
vermessenen optischen Abbildungssystems durch Verstellung von bei
diesem Abbildungssystem vorhandenen xy- und/oder z-Manipulatoren,
z.B. bei einem Mikrolithographie-Projektionsobjektiv.

20

Durch die genannten Verfahren können die zur Verzerrungskorrektur
des Pupillenbildes in der Detektorebene benötigten Informationen gewonnen werden. Die Anwendung eines solchen Verzeichnungskorrekturverfahrens für Vermessungsvorrichtungen vom S-BIF-Typ erlaubt
25 außerdem eine Gütequalifizierung der verwendeten detektorseitigen
Abbildungsoptik. Es versteht sich, dass die erwähnten Verfahren zur
Bestimmung der Verzeichnungstransformation und zur entsprechenden
Verzeichnungskorrektur durch Anwenden der inversen Verzeichnungstransformation nicht nur bei lateralen Scherinterferometern, sondern
30 auch bei anderen Wellenfrontvermessungsvorrichtungen verwendbar
sind, z.B. für Punktbeugungsinterferometer. Vorteilhaft ist es insbesondere, eine erfindungsgemäße Vermessung bei hohem Dynamik-

bereich durch Einsatz des Dynamikbereich-Korrekturelements und/oder mehrerer Scherinterferometrie-Beugungsstrukturen verschiedener Periodenlängen und/oder mehrerer Paare von Referenz-Pinhol und Signaldurchlassöffnung bei einem Punktbeugungsinterferometer, jeweils für
5 verschiedene Erfassungsbereich- bzw. Pupillen-Teilbereiche, mit einer erfindungsgemäßen Verzeichnungskorrektur zu kombinieren.

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur interferometrischen Wellenfrontvermessung eines optischen Systems, mit
 - einer Detektoranordnung (11) zur Positionierung im Strahlengang hinter dem optischen System (7) für die Detektion eines erzeugten Interferenzmusters einer Wellenfront innerhalb eines Erfassungsbereichs und
 - einem Dynamikbereich-Korrekturelement (12, 12a) zur Positionierung im Strahlengang vor der Detektoranordnung, das darauf ausgelegt ist, die Variation des ortsabhängigen Verlaufs einer Phase der das Interferenzmuster bildenden Wellenfront über den Erfassungsbereich hinweg unter einem vorgebbaren Grenzwert zu halten.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, wobei sie vom mit lateraler Scherinterferometrie arbeitenden Typ ist und das Dynamikbereich-Korrekturelement darauf ausgelegt ist, die zweiten partiellen räumlichen Ableitungen der Phase der das Interferenzmuster bildenden Wellenfront über den Erfassungsbereich hinweg unter einem vorgebbaren Schwellwert zu halten.
3. Vorrichtung nach Anspruch 1, wobei das Dynamikbereich-Korrekturelement aus der Gruppe ausgewählt ist, die ein computer-generiertes Hologramm-Element, ein anderes diffraktives optisches Element und ein asphärisches Linsenelement umfasst.
4. Vorrichtung nach Anspruch 3, wobei für das Dynamikbereich-Korrekturelement und eine Beugungsgitterstruktur ein gemeinsamer transparenter Träger (9) vorgesehen ist, an dessen Vorderseite die

Beugungsgitterstruktur und an dessen Rückseite das Dynamikbereich-Korrekturelement angeordnet sind.

5. Vorrichtung zur Wellenfrontvermessung eines optischen Systems durch laterale Scherinterferometrie, mit
 - wenigstens einem Maskenstrukturelement (8, 8a) zur Positionierung im Strahlengang vor dem optischen System,
 - wenigstens einem Beugungsstrukturelement (9, 9a) mit wenigstens einer periodischen Beugungsstruktur zur Positionierung im Strahlengang hinter dem optischen System und
 - einer Detektoranordnung (11, 11a) zur Positionierung im Strahlengang hinter dem Beugungsstrukturelement zur Detektion eines erzeugten Interferenzmusters einer Wellenfront innerhalb eines Erfassungsbereichs,
 - wobei ein Satz von mehreren Beugungsstrukturen unterschiedlicher Periodenlängen auf dem oder den Beugungsstrukturelementen und von korrespondierenden Maskenstrukturen auf dem oder den Maskenstrukturelementen vorgesehen ist, um für wenigstens zwei verschiedene Teilbereiche (P1, P2, P3) des Erfassungsbereichs das optische System mit Beugungsstrukturen unterschiedlicher Periodenlängen zu vermessen.
6. Vorrichtung nach Anspruch 5, wobei wenigstens eine erste Beugungsstruktur mit einer ersten Periodenlänge zur Vermessung des optischen Systems in einem ersten Erfassungsbereich-Teilbereich (P1) und eine zweite Beugungsstruktur mit einer gegenüber der ersten Periodenlänge größeren, zweiten Periodenlänge zur Vermessung des optischen Systems in einem zweiten Erfassungsbereich-Teilbereich (P2) mit gegenüber dem ersten Erfassungsbereich-Teilbereich höherer Wellenfront-Phasenmodulation vorgesehen sind.

7. Vorrichtung zur Wellenfrontvermessung eines optischen Systems durch Punktbeugungsinterferometrie, mit
 - einer Pinholemaske (34) zur Positionierung im Strahlengang vor dem optischen System,
 - einem strahlaufteilenden Element (35) zur Erzeugung eines Messstrahls und eines Referenzstrahls,
 - wenigstens einer detektorseitigen Lochmaskenstruktur (38, 39, 40) zur Positionierung im Strahlengang hinter dem optischen System mit einem Referenz-Pinhole (39) für den Referenzstrahl und einer davon beabstandeten Signaldurchlassöffnung (40) für den Messstrahl und
 - einer Detektoranordnung (44) zur Positionierung im Strahlengang hinter der detektorseitigen Lochmaskenstruktur zur Detektion eines erzeugten Interferenzmusters innerhalb eines Erfassungsbereichs,
 - wobei ein Satz von mehreren Paaren von Referenz-Pinhole (39) und Signaldurchlassöffnung (40) mit unterschiedlichen Abständen von Referenz-Pinhole und Signaldurchlassöffnung vorgesehen ist, um für wenigstens zwei Teilbereiche (P1, P2, P3) des Erfassungsbereichs das optische System mit Lochmaskenstrukturen mit unterschiedlichen Abständen von Referenz-Pinhole und Signaldurchlassöffnung zu vermessen.
8. Vorrichtung nach Anspruch 6 oder 7, wobei eine Auswerteeinheit (13, 13a) zur Auswertung des detektierten Interferenzmusters mit Bestimmung und Korrektur eines Verzeichnungsfehlers vorgesehen ist.
9. Verfahren zur optischen Vermessung eines optischen Systems, bei dem

- vom optischen System kommende Messstrahlung detektiert wird und
 - ein Verzeichnungsfehler durch Bestimmung einer Verzeichnungsfunktion aus einem Vergleich von detektierten Interferenzstreifen-Istpositionen mit rechnerischen Sollpositionen bei Änderung eines oder mehrerer äußerer Parameter ermittelt wird, wobei die Änderung des mindestens einen äußeren Parameters eine Änderung der Position einer Detektoranordnung oder einer Maskenstruktur einer Vermessungsvorrichtung parallel zu einer optischen Hauptachse, eine Änderung der Messstrahlungswellenlänge oder eine Änderung von Aberrationen durch Verstellen von xy- oder z-Manipulatoren des vermessenen optischen Systems oder mehrere dieser Änderungsmaßnahmen umfasst.
10. Verfahren zur optischen Vermessung eines optischen Systems, bei dem
- vom optischen System kommende Messstrahlung detektiert wird und
 - ein Verzeichnungsfehler der detektierten Messstrahlung ermittelt und rechnerisch korrigiert wird,
 - wobei die Ermittlung des Verzeichnungsfehlers durch Berechnen einer Verzeichnungstransformation mittels einer Berechnung des optischen Strahlverlaufs oder durch eine Verzeichnungsmessung mittels Einbringen von Referenzmustern in eine Pupille oder pupillennahe Ebene eines vermessenden optischen Abbildungssystems oder in eine dazu konjugierte Ebene oder durch eine Verzeichnungsmessung mittels Moiré-Strukturen oder durch Bestimmung einer Verzeichnungsfunktion aus einem Vergleich von detektierten Interferenzstreifen-Istpositionen mit rechnerischen Sollpositionen bei Änderung eines oder mehrerer äußerer Parameter erfolgt, wobei die Änderung des mindestens einen äußeren Parameters eine Änderung der Position einer Detektor-

anordnung oder einer Maskenstruktur einer Vermessungsvorrichtung parallel zu einer optischen Hauptachse, eine Änderung der Messstrahlungswellenlänge oder eine Änderung von Aberrationen durch Verstellen von xy- oder z-Manipulatoren des vermessenen optischen Systems oder mehrere dieser Änderungsmaßnahmen umfasst, und

- messtechnisch und/oder rechnerisch einen den Verzeichnungsfehler beschreibende Verzeichnungstransformation ermittelt und der Verzeichnungsfehler rechnerisch durch Anwenden der inversen Verzeichnungstransformation korrigiert wird.

11. Verfahren nach Anspruch 9 oder 10, wobei die optische Vermessung durch eine laterale Scherinterferometrietechnik, eine Punktbeugungsinterferometrietechnik oder eine andere interferometrische Wellenfrontvermessungstechnik erfolgt.
12. Verfahren nach Anspruch 11, wobei die interferometrische Wellenfrontvermessung folgende Schritte umfasst:
 - Platzieren einer Detektoranordnung im Strahlengang hinter dem optischen System, um ein erzeugtes Interferenzmuster einer Wellenfront innerhalb eines Erfassungsbereichs zu detektieren, und
 - Platzieren eines Dynamikbereich-Korrekturlements im Strahlengang vor der Detektoranordnung, das darauf ausgelegt ist, die Variation des ortsabhängigen Verlaufs einer Phase der das Interferenzmuster bildenden Wellenfront über den Erfassungsbereich hinweg unter einem vorgebbaren Grenzwert zu halten.
13. Verfahren nach Anspruch 11 oder 12, wobei die interferometrische Wellenfrontvermessung eine Vermessung durch laterale Scherinterferometrie mit folgenden Schritten umfasst:

- Positionieren wenigstens in s Maskenstrukturelementes im Strahlengang vor d m optischen System,
 - Positionieren wenigstens eines Beugungsstrukturelementes mit wenigstens einer periodischen Beugungsstruktur im Strahlengang hinter dem optischen System und
 - Positionieren einer Detektoranordnung im Strahlengang hinter dem Beugungsstrukturelement, um ein erzeugtes Interferenzmuster einer Wellenfront innerhalb eines Erfassungsbereichs zu detektieren,
 - wobei ein Satz von mehreren Beugungsstrukturen unterschiedlicher Periodenlängen auf dem oder den Beugungsstrukturelementen und von korrespondierenden Maskenstrukturen auf dem oder den Maskenstrukturelementen verwendet wird, um für wenigstens zwei verschiedene Teilbereiche des Erfassungsbereichs das optische System mit Beugungsstrukturen unterschiedlicher Periodenlängen zu vermessen.
14. Verfahren nach Anspruch 11 oder 12, wobei die interferometrische Wellenfrontvermessung eine Vermessung durch Punktbeugungsinterferometrie mit folgenden Schritten umfasst:
- Positionieren einer Pinholemaske im Strahlengang vor dem optischen System,
 - Positionieren wenigstens einer detektorseitigen Lochmaske mit wenigstens einem Paar eines Referenz-Pinholes und einer davon beabstandeten Signaldurchlassöffnung im Strahlengang hinter dem optischen System und
 - Positionieren einer Detektoranordnung im Strahlengang hinter der detektorseitigen Lochmaske, um ein erzeugtes Interferenzmuster einer Wellenfront innerhalb eines Erfassungsbereichs zu detektieren,
 - wobei ein Satz von mehreren Paaren von Referenz-Pinhole und Signaldurchlassöffnung mit unterschiedlichen Abständen von

Referenz-Pinhole und Signaldurchlassöffnung verwendet wird, um für wenigstens zwei verschiedene Teilbereiche des Erfassungsbereichs das optische System mit Lochpaaren unterschiedlichen Abstands von Referenz-Pinhole und Signaldurchlassöffnung zu vermessen.

Zusammenfassung

1. Vorrichtung und Verfahren zur Wellenfrontvermessung eines optischen Systems.
- 2.1. Die Erfindung bezieht sich auf eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Wellenfrontvermessung eines optischen Systems, insbesondere durch eine interferometrische Messtechnik.
- 2.2. Erfindungsgemäß wird ein Dynamikbereich-Korrekturelement im Strahlengang vor der Detektoranordnung angeordnet, das darauf ausgelegt ist, die Variation des ortsabhängigen Verlaufs einer Phase der das Interferenzmuster bildenden Wellenfront über einen Erfassungsbereich hinweg unter einem vorgebbaren Grenzwert zu halten. Zusätzlich oder alternativ kann ein Satz von mehreren Beugungsstrukturen unterschiedlicher Periodenlängen bei einer Scherinterferometrieteknik und/oder von mehreren Paaren eines Referenz-Pinholes und einer Signaldurchlassöffnung mit unterschiedlichen Lochabständen bei einer Punktbeugungsinterferometrieteknik für unterschiedliche Teilbereiche des Erfassungsbereichs verwendet werden. Ein verbleibender Verzeichnungsfehler kann durch Bestimmen einer entsprechenden Verzeichnungstransformation und Anwenden der Inversen Verzeichnungstransformation berücksichtigt werden.
- 2.3. Verwendung z.B. zur interferometrischen Wellenfrontvermessung von Mikrolithografie-Projektionsobjektiven und Baugruppen von optischen Systemen.
